

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420452

研究課題名(和文) フェイルセーフ機能の保証を目的とした免震支承 - RC橋脚間の地震時損傷配分の考察

研究課題名(英文) SEISMIC FAILURE ALLOCATION BETWEEN ISOLATORS AND REINFORCED CONCRETE BRIDGE COLUMNS TO ENSURE FAIL-SAFE FUNCTION

研究代表者

松崎 裕 (MATSUZAKI, Hiroshi)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：10506504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：積層ゴム系支承は経年で性能低下を生じ得る他、近年の地震においても、亀裂や破断等の被災事例が散見されている。本研究では、鉛プラグ入り積層ゴム支承を有する免震橋を対象として、大規模地震後であっても速やかに供用できる免震橋を実現するための基礎的検討を行った。免震支承の経年劣化を踏まえて、免震支承 - RC橋脚間において適切な耐力比を確保することで、RC橋脚が終局変位に到達するまでの間に免震支承を破断させずに、高い地震時安全性・復旧性を保証した免震橋が実現されることを示した。

研究成果の概要(英文)：Performance of rubber bearings can be deteriorated, and cracks and rupture of rubber bearings occurred during the past seismic events. A fundamental research was conducted to realize isolated bridges which can be in operation immediately even after large earthquakes. It was shown that rupture of isolators can be prevented and that isolated bridges with high seismic safety and high reparability can be realized by ensuring the appropriate capacity ratio between isolators and bridge columns considering deterioration of isolators.

研究分野：地震工学

キーワード：免震支承 - RC橋脚系 地震動 経年劣化 耐力比 非線形応答 損傷配分 安全性 復旧性

1. 研究開始当初の背景

(1) 積層ゴム系支承を用いた橋梁の地震被害

既往の金属系支承に関する地震被害を受けて、特に1995年兵庫県南部地震以降、積層ゴム系支承の活用が進んできた。高い変位追従性を有する積層ゴム系支承は、既設橋梁の支承交換による耐震性能向上にも活用されてきており、橋梁の地震時安全性の向上に大きく寄与してきた。

そうした中で、2011年東北地方太平洋沖地震では、免震支承を含めて、積層ゴム系支承に亀裂や破断が生じる被災事例が散見された。個々の被災橋梁は、振動特性の異なる構造形式の境界部や曲線橋など、それぞれに被災を受けやすい要因も認められる一方で、積層ゴム系支承を用いた橋梁の地震時安全性について再検証することが必要となる被災事例であった。

なお、研究開始後ではあるが、2016年熊本地震においても、複数の橋梁において、積層ゴム系支承の亀裂や破断の事例が見られた。このように近年の複数の被害地震において、積層ゴム系支承を用いた橋梁が潜在的に抱える課題が浮かび上がってきている。

(2) 免震橋の設計における損傷部材

積層ゴム系支承を用いた橋梁の中で、免震橋に焦点を当てると、免震橋では、設計地震動に対して、確実に免震支承を先行して降伏させることで、主に免震支承において地震エネルギーが吸収されるように設計上の限界値を定めて設計されている。設計地震動に対する安全性の照査としては、このようなプロセスに問題はない。

一方で、問題となり得るのは、設計における想定とは異なる地震動が入力された場合に、免震橋として、どの部材が最終的に損傷し得るのかを構造計画・構造設計において意識しなくてもよい体系になっている点である。特に、前記したような支承の破断が生じた場合には、当該被災橋梁の迅速な復旧・供用再開において大きな障害となる。そのため、設計における想定とは異なる地震動入力下における免震橋の応答特性を検討しておく必要がある。

なお、支承を損傷させることによって一定以上の荷重が橋脚に伝達しないようになる支承ヒューズ論が唱えられた時代もあった。一方、現在の耐震設計の考え方では、一般的な桁橋においては、橋脚基部に曲げ損傷を誘導することが基本となっている。こうした非免震橋において、支承を破断させないことの重要性が認識されてきたのも、迅速な復旧ができるか否かが重要な点だからである。設計地震動に対して確実に免震支承においてエネルギー吸収を図ることは前提とした上で、万一の場合に、免震橋のどの部材に損傷を誘導すべきかの議論において、異なる構造形式における設計の考え方は参考になる。

(3) 積層ゴム系支承の経年劣化

積層ゴム系支承は、ゴム製品であることから、経年によってゴムの硬化や破断ひずみの低減が生じる一方で、概観では性能低下の影響を認識しにくい欠点がある。十数年、実際の橋梁において使用されてきた積層ゴム系免震支承を対象として載荷実験を行ったところ、支承としてのせん断剛性が2割程度増加し、破断ひずみが2割程度低減し、エネルギー吸収を担保するための鉛プラグも損傷して、支承の切片荷重が半減する事例などが、近年、報告されている。

こうした免震支承の経年劣化の影響を踏まえて、橋梁のライフタイムにわたって所要の地震時安全性・復旧性を担保できるようにし、必要に応じて、支承交換の時期に関する意思決定も行っていく必要がある。そのためには、免震支承の経年劣化が橋梁の地震応答特性、地震時安全性・復旧性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

1. で述べた研究の背景を踏まえて、以下の項目を明らかにすることを本研究の目的とした。

- (1) 現在の設計基準で設計された免震橋が設計における想定とは異なる地震動入力を受けた場合の地震応答特性、損傷部材を明らかにする。
- (2) 経年劣化した免震支承が免震橋の地震応答特性や地震時安全性に及ぼす影響を明らかにする。
- (3) (1)および(2)を踏まえて、ライフタイムにわたって所要の地震時安全性・復旧性を担保できる免震橋における構造諸元の在り方を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 免震橋のモデル化と解析方法

本研究では、ゴムの寸法と鉛プラグの断面積によって自由に諸元を変化させられる鉛プラグ入り積層ゴム支承を用いた免震橋を対象とした。設計地震動に対する応答レベルを基準にすると、さらに強非線形領域の応答を対象とするため、ハードニングを考慮したトリリニア形モデルで鉛プラグ入り積層ゴム支承の力学的特性をモデル化した。その上で、地震動強度を変化させた動的解析を個別に繰り返し行い、地震動強度と免震橋の地震応答との関係を明らかにできる漸増動的解析を行った。さらには、免震支承は破断、RC橋脚は終局変位への到達を終局限界状態として、免震支承およびRC橋脚の材料特性および力学的特性に関する不確定性を考慮した免震橋の動的解析に基づくフラジリティ評価を行った。フラジリティ評価においては、免震支承とRC橋脚のいずれが先行して終局限界状態に到達するのかに着目して評価した。構造系としての終局限界状態の生起は、

免震支承あるいは RC 橋脚のいずれかで終局限界状態が生起することをもって評価した。

(2) 解析対象とした免震橋

本報告書では同一の RC 橋脚を有し、免震支承の寸法が異なる 2 つの構造系を対象とする。いずれも、2012 年道路橋示方書の設計基準を満足するが、免震支承の寸法は、構造系 1 では幅 450mm、総ゴム層厚 80mm であるのに対し、構造系 2 では幅 600mm、総ゴム層厚 140mm である。構造系 1 を基準とすると、構造系 2 の免震支承の方が破断耐力も破断までのせん断変形の変位も大きいことになる。本研究では、終局的損傷が免震支承と RC 橋脚のいずれの部材に誘導されるかの指標とする観点で、RC 橋脚の終局耐力に対する免震支承の破断耐力の比を免震支承-RC 橋脚間の耐力比と定義し、この耐力比の違いに着目した検討を行った。

(3) 想定した免震支承の経年劣化

本研究では、熱酸化劣化に伴うせん断剛性の増大および破断ひずみの低減を考慮した地震時損傷評価を行った。このうち、特に経年劣化に伴う免震支承の破断ひずみの変化特性については、依然として不明な点が多い。ここでは表面から一定範囲内においてゴムの物性が経年で変化する実験事実、せん断剛性の変化と破断ひずみの変化の関係に基づき、せん断剛性の初期値に対する増加比率と同じ比率だけ、破断ひずみが経時的に低減していくものと想定した。鉛プラグについては、経時的に性能低下しないものと想定した。

(4) 入力地震動

道路橋示方書に示される加速度応答スペクトルに適合するように既往の強震記録 30 成分を振動数領域で振幅調整した地震動を基準地震動(振幅倍率 100%)とした。検討結果を示す際に観測記録名で記すが、いずれも加速度応答スペクトルが道路橋示方書のスペクトルに適合するように振幅調整した地震動である。振動数間の加速度応答スペクトルの比は一定とした上で、振幅倍率を任意に変化させることで、設計における想定を超える地震動入力があった場合の基本的な非線形応答特性について検討した。

4. 研究成果

(1) 免震支承が健全な状態における免震橋の地震応答特性および地震時損傷部材

材料特性・力学的特性は平均値で確定値として与えた漸増動的解析結果について、免震支承-RC 橋脚間の耐力比が相対的に低耐力比である場合と高耐力比である場合とに分けて、図 1 および図 2 に示す。いずれも、強震記録 30 成分の中から、KiK-net 長岡 EW 成分と KiK-net 小国 NS 成分の 2 記録に対する応答を例示している。1 自由度系の弾性応答が等しくなるように調整されているにも関

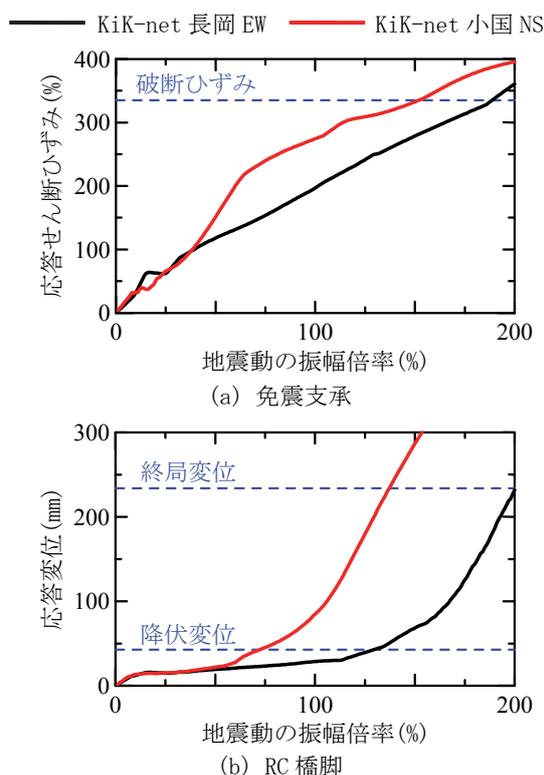


図 1 低耐力比の構造系 1 における応答特性

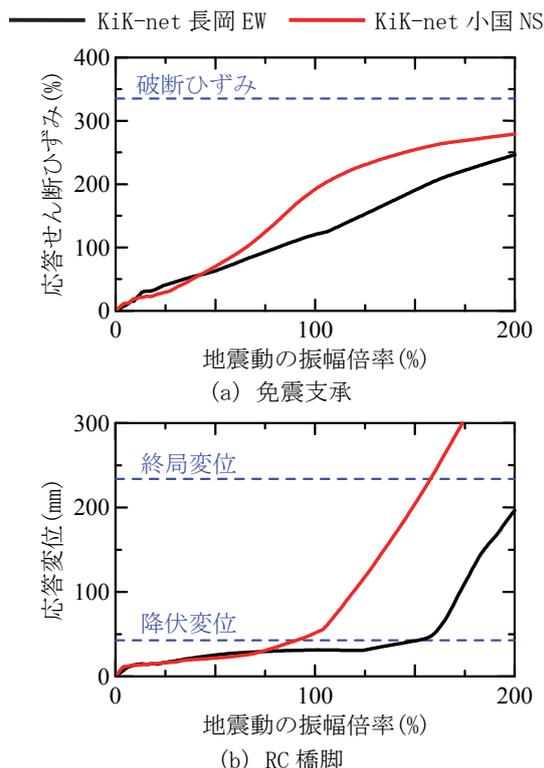


図 2 高耐力比の構造系 2 における応答特性

わらず、構造系の非線形応答を支配する入力地震動の位相特性の違いによって、免震支承および RC 橋脚の非線形応答は有意に変化していることが確認される。先行して免震支承が降伏して、設計地震動に対しては、免震支承において地震エネルギーが吸収されている点は、いずれの構造系においても共通である。設計地震動を超過した強度を有する地震

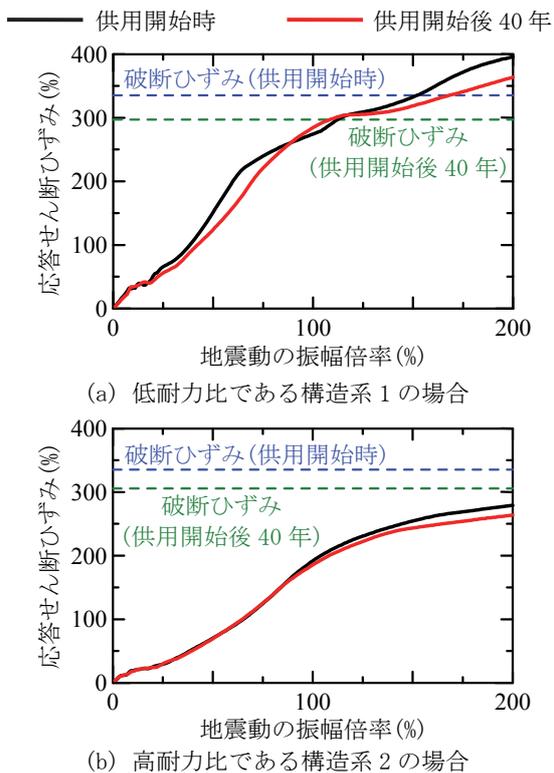


図3 KiK-net 小国 NS を入力した場合の応答特性

動群に対する応答として、低耐力比である構造系1では、地震動によっては、免震支承が先行して破断し、より小さな変形で構造系として終局限界状態に到達している。免震支承の破断ひずみに関するばらつきも踏まえると、免震支承が破断することで構造系1は終局限界状態に到達することを図1は示唆している。一方で、高耐力比である構造系2では、図2に示すように、より大きな応答を示すKiK-net 小国 NS 成分に対して、RC 橋脚が終局変位に到達するまでの間に免震支承が破断しないように応答を制御できていることが確認される。また、このように免震支承に生じる応答せん断ひずみを低減させることで、免震支承から RC 橋脚へ伝達される荷重も低減させられる。そのため、図1(b)と図2(b)の比較から明らかなように、RC 橋脚の応答が終局変位に到達する地震動強度がより大きくなり、構造系としての地震時安全性が向上することが確認される。

(2) 免震支承の経年劣化を考慮した場合の免震橋の地震応答特性と地震時損傷評価

供用開始時と供用開始後40年での経年劣化状態における免震支承の応答特性について、材料特性・力学的特性について平均値ベースで評価したものを図3に示す。図3(a)に示されるように、低耐力比である構造系1では、地震動強度が増加する程、免震支承の応答が大きくなり、容易に破断ひずみ相当の応答が生じる。一方で、図3(b)に示されるように、高耐力比である構造系2では、供用開始後40年が経過し、破断ひずみが相応に低

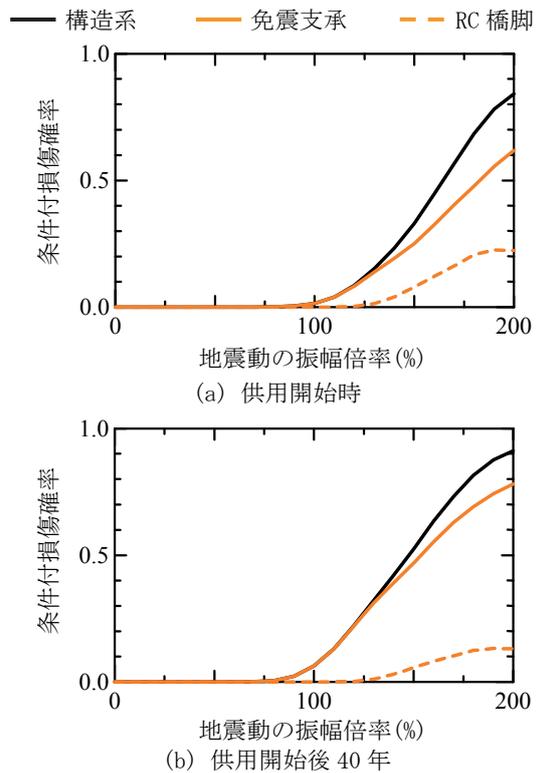


図4 低耐力比である構造系1のフラジリティ曲線

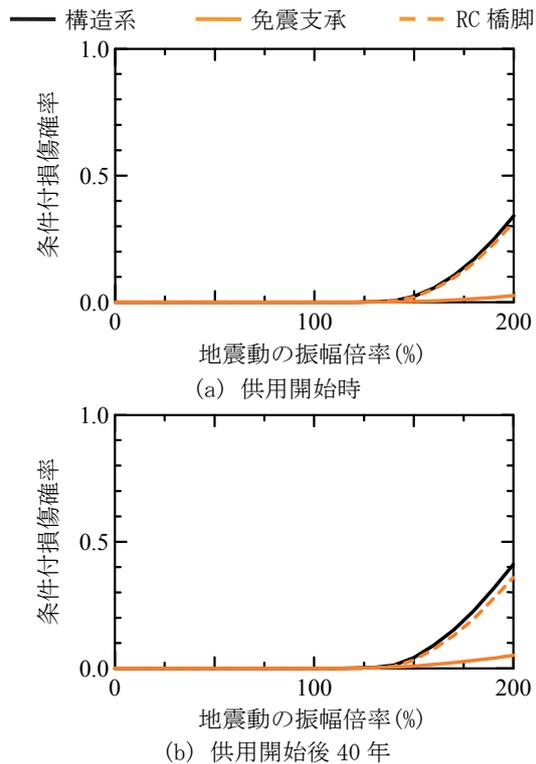


図5 高耐力比である構造系2のフラジリティ曲線

減した状態でも、設計地震動よりも強い地震動入力下であっても免震支承が破断しないことが確認される。

以上は、材料特性・力学的特性について平均値で確定値として与えた上での検討結果であったが、それらの不確定性を考慮して算定した供用開始時と供用開始後40年におけるフラジリティ曲線を図4および図5に示す。

構造系1では、免震支承が健全な状態において、主として免震支承の破断により、構造系の終局限界状態が決定している。そして、免震支承の経年劣化が進展することにより、免震支承の破断確率がさらに上昇し、その結果として、構造系としても地震時安全性が低下することが示されている。構造系1に対して、構造系2では、免震支承の平面寸法が大きくなり、経年劣化の影響を受けにくくなっている。さらには、経年劣化が生じて、前記した漸増動的解析結果からも推察されるように、十分に免震支承の応答と限界値である破断ひずみの関係が離れているため、免震支承の破断を防ぎ、構造系としての終局的損傷をRC橋脚に誘導できる。このことは、一般の桁橋において、支承を破断させずに、橋脚に損傷を誘導していることとも整合しているが、万一、生じた場合には長期の復旧期間を要する免震支承の破断を防げる点が極めて重要である。

このように、ライフタイムにおいて生じ得る経年劣化を踏まえた上で、免震支承-RC橋脚間の耐力比を制御することで、経年劣化や設計における想定とは異なる地震動入力に対しても、RC橋脚が終局変位に到達するまでに免震支承が破断しないようになる。これにより、構造系として粘り強く変形できる免震橋が実現されることから、ライフタイムにわたって高い地震時安全性・復旧性を保証することができる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① 松崎裕、小野寺周、津村拓都、鈴木基行、免震支承の経年劣化が免震支承-RC橋脚系の地震時損傷モードに及ぼす影響に関する基礎的研究、構造工学論文集、査読有、Vol. 63A、2017、pp. 397-410
- ② 松崎裕、免震化による既存コンクリート構造物の地震時安全性の向上、コンクリート工学、査読有、Vol. 55、No. 2、2017、pp. 182-188
- ③ 小野寺周、松崎裕、鈴木基行、極大地震動に対する免震支承-RC橋脚系のキャパシティデザインに関する研究、土木学会論文集 A1(構造・地震工学)、査読有、Vol. 72、No. 4、2016、pp. I_708-I_718
DOI:10.2208/jscejsee.72.I_708
- ④ 松崎裕、小野寺周、鈴木基行、地震動の不確実性が免震支承-RC橋脚系の地震時損傷に及ぼす影響に関する基礎的研究、日本地震工学会論文集、査読有、Vol. 16、No. 1、2016、pp. 228-237
DOI:10.5610/jaee.16.I_228
- ⑤ 小野寺周、松崎裕、鈴木基行、免震支承の経年劣化が免震支承-RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響、土木学会論文集 A1(構

造・地震工学)、査読有、Vol. 71、No. 4、2015、pp. I_737-I_748

DOI:10.2208/jscejsee.71.I_737

[学会発表] (計20件)

- ① 松崎裕、久保陽平、津村拓都、運上茂樹、漸増動的解析に基づく免震橋の地震時安全性評価に関する基礎的検討、日本地震工学会第13回年次大会、2017
- ② 久保陽平、津村拓都、松崎裕、免震支承における損傷比率と免震支承-RC橋脚間の耐力比の関係に基づく免震支承の経年劣化の影響に関する基礎的検討、土木学会第72回年次学術講演会、2017
- ③ 津村拓都、久保陽平、松崎裕、免震支承における損傷比率と対応した免震支承-RC橋脚間の耐力比指標に関する基礎的検討、土木学会第72回年次学術講演会、2017
- ④ Matsuzaki, H. and Tsumura, T., Resilient Isolated Bridges against Extreme Ground Motions and Deterioration of Isolators, 12th International Conference on Structural Safety and Reliability, 2017
- ⑤ 松崎裕、久保陽平、津村拓都、運上茂樹、免震支承における損傷比率と対応した免震支承-RC橋脚間の耐力比指標に関する基礎的検討、第20回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム、2017
- ⑥ 久保陽平、津村拓都、松崎裕、劣化・地震動による支承の破断を防ぐ免震支承-RC橋脚間の耐力比に関する基礎的研究、平成28年度土木学会東北支部技術研究発表会、2017
- ⑦ Matsuzaki, H., Onodera, M. and Suzuki, M., Failure mode evaluation of reinforced concrete bridge columns with isolators subjected to severe ground motions, Fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, 2016
- ⑧ 津村拓都、小野寺周、松崎裕、鈴木基行、免震支承の経年劣化が免震橋梁の地震時損傷配分に及ぼす影響に関する基礎的研究、土木学会第71回年次学術講演会、2016
- ⑨ Matsuzaki, H. and Tsumura, T., Ultimate Failure Modes of Bridges with Reinforced Concrete Bridge Columns Retrofitted by Isolation, 5th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management, 2016
- ⑩ 松崎裕、小野寺周、津村拓都、鈴木基行、免震支承-RC橋脚間の耐力比および免震支承の経年劣化と免震橋における地震時損傷部材の関係に関する基礎的研究、第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム、2016
- ⑪ 小野寺周、松崎裕、鈴木基行、不確実性を考慮した免震支承-RC橋脚系の損傷モード評価、第8回構造物の安全性・信頼

- 性に関する国内シンポジウム、2015
- ⑫ 小野寺周、松崎裕、鈴木基行、極大地震動に対する免震支承-RC橋脚系の地震時安全性の向上を図るために必要な部材間の耐力格差とRC橋脚の変形性能、土木学会第35回地震工学研究発表会、2015
 - ⑬ 小野寺周、松崎裕、鈴木基行、免震支承-RC橋脚間の降伏耐力比が免震橋梁の地震応答に及ぼす影響、土木学会第70回年次学術講演会、2015
 - ⑭ 小野寺周、松崎裕、鈴木基行、地震動強度が免震支承-RC橋脚間の損傷配分に及ぼす影響に関する基礎的研究、第37回コンクリート工学講演会、2015
 - ⑮ 小野寺周、松崎裕、鈴木基行、既存不適格橋梁の免震化に伴う免震支承-RC橋脚間の耐力格差が構造系の損傷モードに及ぼす影響、第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム、2015
 - ⑯ 小野寺周、松崎裕、鈴木基行、免震支承-RC橋脚間の降伏耐力比が地震応答に及ぼす影響、平成26年度土木学会東北支部技術研究発表会、2015
 - ⑰ 松崎裕、小野寺周、鈴木基行、地震動の不確定性が免震支承-RC橋脚系の地震時損傷に及ぼす影響に関する基礎的研究、第14回日本地震工学シンポジウム、2014
 - ⑱ 小野寺周、松崎裕、鈴木基行、免震支承の経年劣化が免震支承-RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響、土木学会第34回地震工学研究発表会、2014
 - ⑲ 小野寺周、松崎裕、鈴木基行、免震支承の力学的特性が免震支承-RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響、土木学会第69回年次学術講演会、2014
 - ⑳ 小野寺周、笠原康平、松崎裕、鈴木基行、免震支承の力学的特性が免震支承-RC橋脚系の地震時損傷配分に及ぼす影響に関する基礎的検討、第17回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム、2014

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松崎 裕 (MATSUZAKI, Hiroshi)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10506504